

- [3] Herodek, S.: A balatoni fitoplankton-kutatás újabb eredményei, Annales Instituti Biologici (Tihany), Hung. Acad. Sci., Tihany, 1977. pp. 181-198.
- [4] S. E. Jorgensen, H. Mejer, M. Triis: Examination of a Lake Model, Ecological Modelling 4 (1978) pp. 253-278.
- [5] R. A. Part et al: A Generalized Model for Simulating Lake Ecosystems, Simulation, August, 1974. pp. 33-50.
- [6] M. Straskraba: Natural Control Mechanisms in Models of Aquatic Ecosystems, IFAC Symposium, 1977. Lipcse, Vol. I. pp. 74-108.
- [7] R. A. Vollenwieder: Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters with Particular Reference to Nitrogen and Phosphorus as Factors in Eutrophication, OECD Technical Report, DAS/SCI/63.27. pp. 159, 1968.

MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézete,
Bányászati Kutató Intézet

A balatoni vizgyűjtő és üledék eutrofizációs hatásának
modellezése

Wittmann Imre, Telegdi László, Hoffmann György,
Bolla Mariann, Bogárdi István

Bevezetés

A Balatonban lejátszódó eutrofizálódási folyamat fő
okai a következők:

- a Kisbalaton lecsapolásával a vízszint jelentős csökkenése és ezzel párhuzamosan egy természetes szűrőrendszer megszűnése éppen a legnagyobb vizgyűjtőn;
- A partrendezési munkálatok során a tavat körülölelő nádas jelentős részének megszüntetése, mely kettős funkciót töltött be: a befolyó vizek tisztítása mellett ide - a szél által hajtva különösen a déli partra - került a tóban felépülő szerves anyag jelentős része, mely ezáltal hosszabb időre kikerült a körforgásból;
- Mindezekkel párhuzamosan a mezőgazdaságból és a felduzzadt üdülő-területekről eredő szennyvíz fokozott növényi tápanyagterhelést jelent.

Amit napjainkban tapasztalunk, nem más, mint az öko-

szisztéma válasza ezekre a hatásokra: egyes területek elmosarasodását a védőövezetek újratermelésére irányuló törekvésként értelmezhetjük, míg a fokozott tápanyagterhelés következtében a tó egészében a biológiai produkció egyre magasabb szintje alakul ki. A jelenlegi körülmények egy részét már adottságként kell elfogadnunk, így érdeklődésünk homlokterében a tavat érő tápanyagterhelés csökkentése áll. Ennek hatékonyságához ismernünk kell a tó élővilágának viselkedését a tápanyagterhelés függvényében. Az előző előadásban ismertetett modell a nyílt vízben lejátszódó folyamatokat írja le. Most bemutatjuk, hogyan teremthető meg a kapcsolat a víztest és környezete között. Ez jelenti egyrészt a tavat érő terhelés, valamint a víz és az üledék közötti tápanyagforgalom leírását.

A szervesanyagok felépítéséhez szükséges elemek közül egyesek korlátlan mennyiségben rendelkezésre állnak, és a többiek mennyisége határozza meg illetve korlátozza a szervesanyag termelést. Mivel a Balatonban a foszfor tekinthető ilyen limitáló faktornak, ezért mindkét ismertetésre kerülő modell a foszforvegyületek forgalmára koncentrál.

A. A Balaton foszforterhelése

1. Foszforforrások a vízgyűjtőn, foszforformák

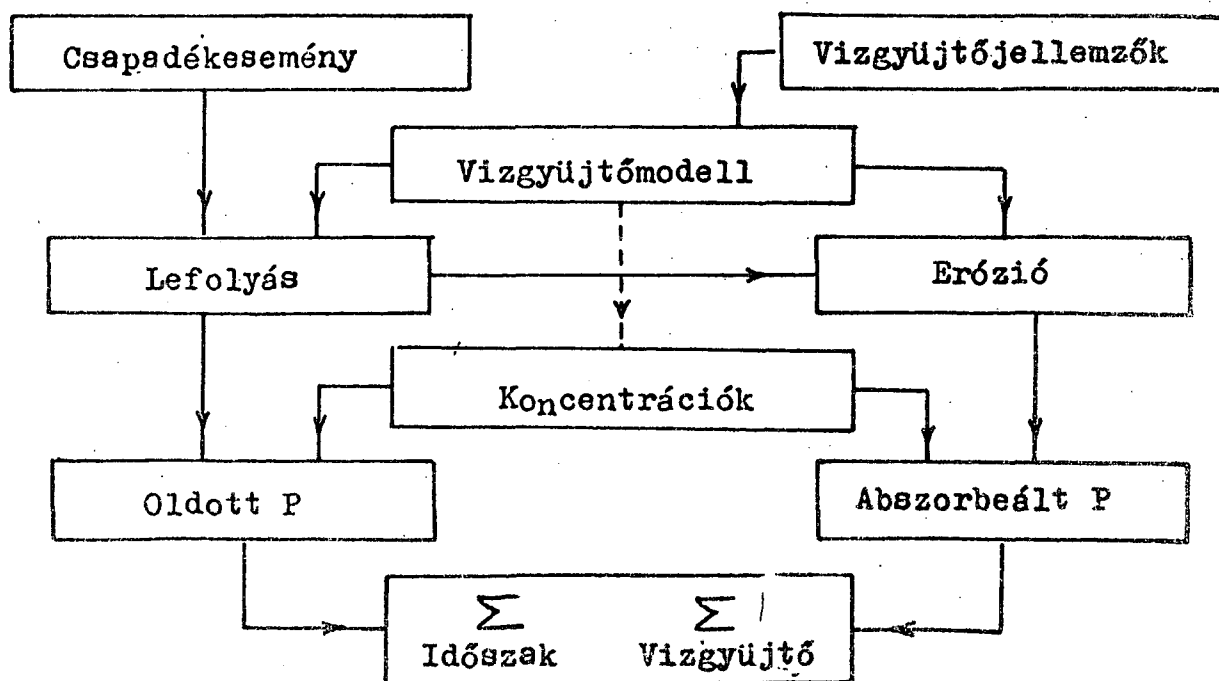
A foszforforrásokat két csoportra osztjuk: pontszerű szennyezőforrásokra (ipari és állattartó telepek szennyvize, csatornázott kommunális szennyviz) és területi bemosó-

dásra, ami egyrészt a mezőgazdasági művelésből, másrészt a nemcsatornázott településektől származik. Az előbbiekről általában kielégítő információ áll rendelkezésre, itt csupán a vizgyűjtőn való levonuláskor végbemenő folyamatok (ülepedés, feldúsulás) módosító hatását kell figyelembe vennünk. A továbbiakban csak a nem-pontszerű szennyeződésekkel foglalkozunk. Mivel a tó élővilága számára hozzáférhető foszforvegyületek pontos összetétele még nem ismert, az input modell egyelőre a tóba jutó összfoszfor mennyiségét méri.

2. A vizgyűjtő modell

Az előbbi modell azon alapul, hogy a nem-pontszerű forrásokból bejutó foszfor jelentős része (becslések szerint mintegy fele) az esőzéseket követő árhullámokkal kerül a tóba. Ez adódik hozzá az alaplefolyás viszonylag egyenletes terheléséhez.

A modell szerkezete a következő:



Ugynevezett csapadékeseményeket szimuláltunk, melyek két valószínűségi változóval, a csapadék mennyiségével (RV) és időtartamával (RD) jellemezhetők, és együttes eloszlásuk az irodalom szerint jól közelíthető Γ - eloszlással (melynek paramétereit a hónapokkal változóknak vettük). Az egyes csapadékesemények között eltelt időt exponenciális eloszlásúnak tekintettük. Ezek és a szóbanforgó vízgyűjtő jellemző adatai (mint pl. a növényzettel való borítottság, átlagos lejtőszög, a talaj elnyelési képességét, a mezőgazdasági művelés jellegét jellemző konstansok, stb.) alapján számítjuk a csapadékesemény indukálta lefolyást (S_1) és az erodált talaj mennyiségét (S_2). Ezeket a megfelelő koncentrációkkal (C_1 , ill. C_2) szorozva nyerjük a tóba kerülő oldott ill. adszorbeált foszfor mennyiségét (η_1 ill. η_2).

$$S_1 = \frac{K_1 \cdot RV}{RV + K_2}, \quad \eta_1 = C_1 \cdot S_1 \quad \text{ill.} \quad S_2 = K_3 \left(\frac{K_4 \cdot S_1^2}{K_5 \cdot RD + K_6} \right)^{K_7}, \quad \eta_2 = C_2 \cdot S_2$$

ahol K_1, \dots, K_6 vízgyűjtőjellemzők, K_7 univerzális állandó. Végül ezeket egy adott időszakokra és különböző vízgyűjtőkre összegezve, valamint hozzáadva az alaplefolyásból és pontszerű forrásokból származó mennyiséget, nyerjük az egész tó terhelését.

A modell kritikus pontja a koncentrációk meghatározása. A rendelkezésre álló adatok analízisével azt találtuk, hogy a koncentrációk eloszlása lognormálisnak vehető és feltehető, hogy független a vízhozamtól.

3. Szimulációs eredmények

A szimulációt egyelőre a Tetves patak vizgyűjtőjére végeztük el egyrészt, mert itt álltak megfelelő adatsorok rendelkezésünkre, másrészt pedig a patak által szállított foszfor nagy része területi bemosódásból származik (jelentős pontszerű szennyezőforrás nincs a környéken). A Tetves vizgyűjtője azért is alkalmas kalibrálásra, mert elég kis terület ahhoz, hogy a modell feltevései teljesüljenek rá. A szimulációt egy évre végeztük. Ilyen módon a nyert oldott foszfor összmenyisége kb. 10 %-kal haladta meg a vártat. Ez - a foszfor mérésénél fellépő bizonytalanságot is figyelembe véve - elég jó eredménynek mondható, ami a paraméterek kalibrálásával tovább javítható.

4. A modell fejlesztésének irányai

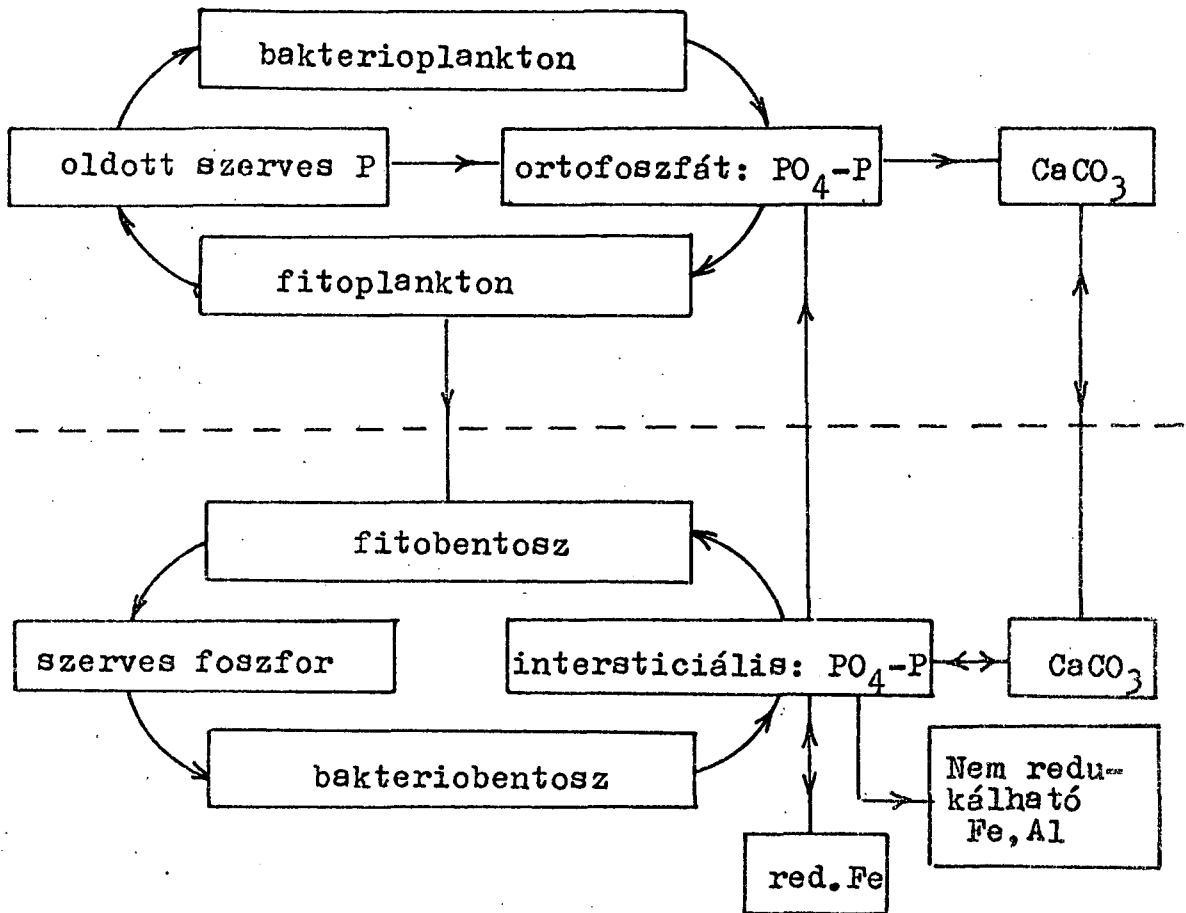
- a koncentrációk ingadozásait magyarázó tényezőket kell keresnünk, s ezeket a modellbe beépíteni (pl. utolsó műtrágyázás időpontja, a lakosság száma)
- próbálkozni fogunk a napi ingadozást leíró sztochasztikus modellel,
- figyelembe kívánunk venni egyéb forrásokat is:
a légkörből közvetlenül a porral bejutó foszfor,
hóolvadás,
- a modell alkalmasság tétele nagyobb vizgyűjtőkre.

B. A víz-üledék tápanyagcsere

1. A Balaton sajátosságai

A Balatonnak két olyan jellegzetessége van, mely az eutrofizálódás szempontjából alapvető jelentőségű s amelyek élesen elhatárolják a tavak többségétől. Az egyik, sekély jellege. Ennek következtében a tóban felépülő és lesüllyedő szervesanyag nem válik ki a körforgásból, hanem a fenéken lebomolva túlnyomó része újra visszakeveredik. Ezt egyértelműen, mint az eutrofizálódást erősítő folyamatot értékelhetjük. A másik sajátosság, hogy a Balaton jellegzetesen meszes üledékű tó. A fotoszintézis során keletkező nagy mennyiségű biogén mészs a vízben levő és a fitoplankton számára táplálékul szolgáló ortofoszfát jelentős részét megköti és ezáltal az ortofoszfát koncentrációját állandóan alacsonyan ($2-3 \mu\text{g/l}$) tartja, foszfáthiányos állapotot idéz elő. Enélkül a mechanizmus nélkül a tó alighanem már súlyosan eutróf állapotban lenne.

2. A tó foszforforgalma



Az ábrán láthatjuk a már ismert alga-oldott szerves P-baktérium- PO_4-P kört, melynek megfelelője (fitobentosz - intersticiális PO_4-P - bakteriobentosz - szerves foszfor) megtalálható az üledékben. Valójában a két kör nem létezik egyidejűleg, ezzel a szerkezettel csak azt akarjuk elérni, hogy a szabadvízi és a jég alatti periódust ugyanaz a modell

1. Die ersten 100 Jahre

Die ersten 100 Jahre der Geschichte der Stadt sind in der Geschichte der Stadt sehr wichtig. In dieser Zeit wurde die Stadt gegründet und es wurde viel gebaut. Die Stadt wurde von den Römern gegründet und es wurde viel gebaut. Die Stadt wurde von den Römern gegründet und es wurde viel gebaut.

2. Die nächsten 100 Jahre

In den nächsten 100 Jahren wurde die Stadt weiter ausgebaut. Es wurden viele neue Gebäude gebaut und die Stadt wurde immer größer. Die Stadt wurde immer größer und es wurden viele neue Gebäude gebaut.

3. Die nächsten 100 Jahre

In den nächsten 100 Jahren wurde die Stadt weiter ausgebaut. Es wurden viele neue Gebäude gebaut und die Stadt wurde immer größer. Die Stadt wurde immer größer und es wurden viele neue Gebäude gebaut. Die Stadt wurde immer größer und es wurden viele neue Gebäude gebaut.

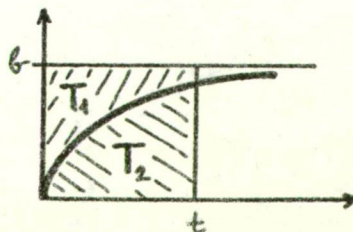
Ezért a bakteriális bomlásból bejövő $\text{Po}_4\text{-P}$ mennyiségét állandónak vesszük. (Később látni fogjuk, hogy ezt a feltevést eleljlthetjük.) Másik feltételezésünk, hogy adott időpontban az ortofoszfát távozási sebessége arányos a pillanatnyi koncentrációval. Ezt érdemes feltenni az összes távozási útra, hiszen a diffúzióra ez helytálló, mert a víz foszfátkoncentrációja gyakorlatilag nem változik, a megkötődési folyamatokra azért, mert úgy képzelhetjük, hogy a megkötő anyagok korlátlanul állnak rendelkezésre, végül a fitobentosz felvételére is, egyrészt mert felkeveredéskor a fitobentosz is távozott, másrészt ez az irány amúgy sem jelentős. $f(t)$ -vel jelölve a $\text{Po}_4\text{-P}$ távozási sebességét az összes úton a t időpillanatban, feltevésünk a következő alakú:

$$f(t) = K \int_0^t [b - f(y)] dy$$

ahol $b(t) = b$ a bakteriális bomlás sebessége, és a 0 időpontban volt felkeveredés. Innen

$$f(t) = b - e^{-Kt}$$

Vagyis a feltöltődés a következőképpen játszódik le:



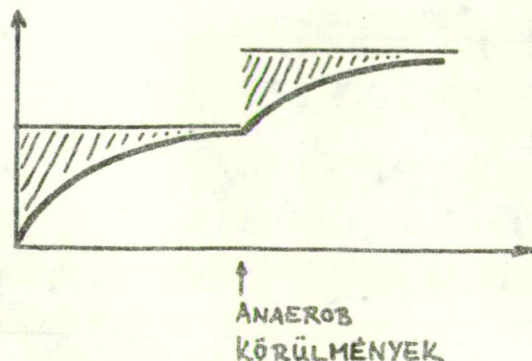
a t időpontig felgyülemelő foszfát:

$$T_1 = \frac{1}{K} - \frac{1}{K} e^{-Kt}$$

a t időpontig távozó foszfát:

$$T_2 = bt + \frac{1}{K} e^{-Kt} - \frac{1}{K}$$

Vegyük észre, hogy $T_1 \rightarrow \frac{1}{K}$ ha $t \rightarrow \infty$ vagyis az egyensúlyi ortofoszfát-koncentráció független a bakteriális bomlás sebességétől. Ez módot ad arra, hogy $b(t)$ -t lépcsőfüggvénynek vegyük. Hosszabb nyugalmi periódus után az állandó bakteriális bomlás következtében és fotoszintézis hiányában a körülmények anaerobbá válnak. Ilyenkor a CaCO_3 és a redukálható Fe-hoz kötődött $\text{Po}_4\text{-P}$ kioldódása megkezdődik, és ezzel párhuzamosan az aerob baktériumok helyett anaerobok lépnek működésbe. A lejátszódó folyamatot ugyanolyan jellegűnek képzeljük, mint az aerob esetben, csak most egy magasabb egyensúlyi ortofoszfát koncentráció alakul ki.



Ezzel egyidejűleg természetsszerűleg megváltozik a távozó foszformennyiség aránya.

Az anaerobitás bekövetkezését pillanatszerűnek gondoljuk, ez, figyelembe véve a modellezési lépésközünket (legalább fél nap), nem túl durva feltételezés. Az anaerobrá válás jelenleg csak az eltelt idő és a bakteriobentosz/fitobentosz hányados függvénye, így gyakorlatilag mindig ugyanannyi idő után lép fel. Szükségesnek tartjuk, hogy a későbbiekben a viztestben az oxigénkoncentráció nyomonkövetésével, a diffúzióval lejutó oxigént is figyelembe tudjuk venni.

Végül a felkeveredést jelenleg nagyon egyszerűen kezeljük: adott ideje tartó adott erősségű szél esetén bekövetkezik a felkeveredés, mikor is az intersticiális $\text{PO}_4\text{-P}$ és a fitobentosz átkerül a viztest megfelelő kompartmentjébe. Egyelőre megfelelő hidrodinamikai ismeretek hiányában nem tudunk részleges felkeveredést szimulálni. Felkeveredéskor bizonyos mennyiségű CaCO_3 is kerül a viztestbe, mely a följutó $\text{PO}_4\text{-P}$ egy részét megköti. Ennek mennyiségét együttes szél-lebegőanyag tartalom mérések alapján becsüljük.